

銅および稀薄銅合金の機械的性質の結晶粒径依存性

著者	小野 陽
号	725
発行年	1978
URL	http://hdl.handle.net/10097/9461

氏 名	おのの 小 野 陽
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 54 年 3 月 27 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 金属材料工学専攻
学 位 論 文 題 目	銅および稀薄銅合金の機械的性質の結晶粒径依存性
指 導 教 官	東北大学教授 辛島 誠一
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 辛島 誠一 東北大学教授 須藤 一 東北大学教授 和泉 修

論 文 内 容 要 旨

単相の FCC 金属，合金の 1 軸引張における挙動とバウシinger 効果の結晶粒径依存性を調べ，微小ひずみ，巨視的降伏，巨視的変形域での加工硬化，それにバウシinger 効果というこれまで個別の研究課題として取り上げられる傾向が強かった諸問題について，それら相互の関連を明らかにし，また多結晶の変形についての「準巨視的理論」，より微視的な「転位論」の双方の立場から考察を加えることにより，多結晶の強度とその粒径依存性の問題について総合的な理解を深めることが試みられた。

第 2 章「FCC 多結晶体の変形の準巨視的理論」では，多結晶体の巨視的変形における粒間の拘束力の効果の評価についての理論的，実験的な対立が明らかにされ，その対立を解くため理論計算にもとづいた新たな提案がなされた。これまでの実験によって多結晶体の加工硬化曲線は，強い粒間の拘束力を仮定する Taylor モデルにもとづいて多重すべり単結晶の加工硬化曲線， $\tau = f(\Gamma)$ ，(τ はせん断応力， Γ はせん断ひずみ) から次のように導き出すことができることが示されている。すなわち，多結晶の変形応力，のびひずみを σ ， ϵ とすれば

$$\sigma = \Phi \cdot f(\Phi \cdot \epsilon) \quad (1)$$

$$\Phi = \bar{M} = 3.06 \quad (2)$$

ここで Φ は方位因子， \bar{M} は平均 Taylor 因子である。

ところが、変形組織の観察においてはTaylorモデルから予想される「すべての粒における多重すべり」が現実にはおこっていないことが示されており、しばしばTaylorモデルと対照的に弱い粒間の拘束を仮定するSachsモデルを支持する証拠とみなされている。

理論的にはSachs, Taylorの両モデルとも単純化のために極端な仮定を採用しており、それ以後、より現実的な仮定にもとづいて拘束力の問題を取扱う理論が展開されているが、上述のような実験結果の間の矛盾に対する説明は与えられていない。

そこで本研究では、いろいろな準巨視的モデルの中で比較的簡明で粒間の拘束力の効果についてかなり現実に近い記述を与えると考えられる、いわゆるKBWモデルを用いて粒間の拘束力の発達の間方位因子 Φ と多重すべりの程度、すなわち平均の活動するすべり面の数 \bar{n} の関係を計算した。それによれば、 Φ と \bar{n} の関係は線形ではなく、したがってTaylorモデルで仮定されている完全な拘束が現実の多結晶の変形において実現されない場合、そのような拘束の弱まりによって Φ の値はTaylorモデルの値からあまり変化しないにもかかわらず \bar{n} の値は大きく減少することが予想された。たとえばOnoによって測定された $\bar{n} \approx 2.6$ に対応する Φ の値は $\Phi \approx 2.95$ とTaylorモデルの値に非常に近い。したがって、上述のような実験結果の矛盾はこのような粒間の拘束力の性質に由来するものと考えられ、Taylorモデルはそれに反する組織観察の結果にもかかわらず方位因子 Φ については十分に良い近似を与えることがわかった。

ところで、このような準巨視的理論からの解析においては粒間の拘束力の強さは結晶粒径に依存せず、したがって加工硬化挙動の結晶粒径依存性はより微視的な要因、すなわちすべり転位と結晶粒界の相互作用から生じていると考えられている。

そこで第3章「銅多結晶の加工硬化の結晶粒径依存性」においては、そのような巨視的変形域での加工硬化の粒径依存性の問題を取扱う。FCC純金属、合金多結晶の加工硬化の粒径依存性についてのこれまでの実験結果の中で、変形応力の粒径依存性がひずみとともに減少し、ついには粒径の異なる試料の応力-ひずみ曲線が交差することがしばしば報告されている。このような挙動は「交差効果」などと呼ばれ、加工硬化の粒径依存性についてのこれまでのモデルからは予想されない特異な挙動である。

このような交差効果の原因として、1) 粒界近傍での動的回復、2) 結晶粒成長にともなう再結晶集合組織の発達、の2つが示唆されているが、本研究ではこれらの可否を確かめるために、1) 加工硬化の粒径依存性の変形温度による変化、2) 再結晶焼鈍前の冷間加工度の異なるシリーズの試料の結果の比較、を行なった。まず再結晶焼鈍前の冷間加工度の大きいAシリーズの試料では粒径の増大とともに多くの双晶を含む粗大結晶粒が生長したがX線写真によればその多くがいわゆる繊維集合組織に属する方位を持つことが知られた。一方、冷間加工度の小さいBシリーズの試料では、どの粒径の試料についても均一な粒方位分布がえられた。引張試験の結果、Aシリーズ試料においては473°K、室温77°Kのどの温度でも交差効果があらわれ、Bシリーズ試料ではどの温度でも交差効果がみられなかった。このような結果は、交差効果が粒界近傍の動的回復によるとする考えを否定し、それが再結晶集合組織によるとする考えと合致するものである。

すなわち、集合組織の発達によって粒方位分布にかたよりが生じると(1)式の方位因子 Φ の値が変化し、微視的には同一の加工硬化挙動がおきていて $\sigma - \epsilon$ 曲線にvarietyがないとしても見かけ上異なった $\sigma - \epsilon$ 曲線が観察されることになる。本実験のAシリーズ、Bシリーズの挙動のちがいが、このような方位因子の変化を考えることにより良く説明できた。

このように、多結晶の加工硬化曲線は集合組織の有無により直接的な影響を受ける。そのような影響が少ないBシリーズ試料においては、変形応力の粒径依存性は巨視的降伏以後、ひずみの増加とともにわずかに減少したが、基本的には巨視的降伏時のそれによって決まっていると思われる。また、変形応力の粒径依存部分と非依存部分の比は低温ほど大きく、粒径依存性をつくり出している硬化機構はそうでない硬化機構より大きな温度依存性を持つことがわかった。

このように変形応力の粒径依存性は、基本的に巨視的降伏応力のそれによってほぼ決定されていることが示されたが、次にそのような巨視的降伏応力の粒径依存性の原因について興味を持たれる。これまでの実験結果によれば、微視的な変形開始応力についてはその粒径依存性は小さく、いわゆる微小ひずみ域における加工硬化挙動の差により巨視的降伏応力の粒径依存性が生じるとされている。このような微小ひずみ域における粒径に依存する加工硬化について、粒界への転位の堆積、粒界からの転位の放出による転位密度の増加、すべり転位の蓄積速度の粒径依存性、などを考えるモデルが提案されているが、いずれの機構が主要な寄与をしているかは現在のところ不明である。また、このような微小ひずみ域では、異なった方位を持った粒が順次降伏して相互の拘束を強めて(1)式で記述されるような巨視的変形域での挙動へ近づく過程が進行すると考えられるが、このような過程を現実の実験結果の解釈にどのように取入れるかもいまだ確立されていない問題である。

そこで第4章「銅およびCu-0.5wt.% Sn合金の微小ひずみ域での加工硬化と巨視的降伏」では、標題の試料を用いて実験を行ない、その挙動が上述の各モデルによりどのように良く説明されるかを検討した。すなわち、変形の開始から巨視的降伏に至るまでの観測された加工硬化量について、第2章の結果から予想される粒間の拘束力の発達によるいわば「見かけの硬化」の寄与を補正し、転位機構の寄与に帰すべき硬化量を求めた。そして、その硬化量とその粒径依存性が巨視的降伏に至るまでの塑性ひずみによってつくり出されることがいずれのモデルにより無理なく説明されるかを検討した。しかし、いずれのモデルでも、それぞれに含まれるいくつかのパラメーターを不自然でない範囲で任意に選ぶことによって実験結果を説明することができ、モデルの可否を判定することができなかった。

このような結果から、微小ひずみ、および巨視的降伏という現象をより良く理解するためには、新たな実験手段が工夫されることが必要であると考えられた。そこで本研究では第5章「銅およびCu-0.5 wt.% Sn合金の微小ひずみ域におけるバウシinger効果」で述べるように、第4章における同じ試料について予ひずみ量、 ϵ_p 、が $2 \times 10^{-4} \sim 10^{-2}$ の範囲でバウシinger効果の測定を行ない、その領域での加工硬化機構とバウシinger効果の発生原因について検討した。

えられた結果は、予ひずみ量 ϵ_p が $1 \sim 2 \times 10^{-3}$ 以下の微小ひずみ域とそれ以後の巨視的変形域でそれぞれ次のような特徴を示した。

1) 微小ひずみ域では全バウシingerひずみ $\epsilon_B(1)$ は ϵ_p の増加とともにはじめ $\epsilon_B(1) = 2\epsilon_p$ に従って急速に増加するが、粒径が大きいほど早期にその関係からずれて増加率が減小する。

2) 巨視的変形域では $\epsilon_B(1)$ の増加はゆるやかで、その増加率はあまり変化せず粒径依存性も小さい。このような挙動は加工硬化の挙動の変化と良く対応していた。また、予ひずみ応力 σ_p と $\epsilon_B(1)$ の関係においても微小ひずみ域での大きな傾きをもつ領域と巨視的変形域でのゆっくりした増加の領域が区別された。

このような実験結果の中で、変形初期の $\epsilon_B(1) = 2\epsilon_p$ という挙動はそこでのバウシinger効果が著るしく大きいことを示し、長範囲内部応力場による硬化の寄与の大きいことを示唆する。しかし、微小ひずみ域においてその関係からのずれがおこることは、そこですでに長範囲内部応力場の緩和が開始していることを示すと思われる。このような内部応力場の発達と緩和の過程が平均的に粒間の拘束力の発達と飽和の過程として取扱えるものと仮定し、KBWモデルにもとづく粒間の拘束力によるバウシinger効果のHutchinsonの計算結果を微視的な加工硬化の効果を含むように拡張して実験結果と比較した。その結果、微小ひずみ域と巨視的変形域それぞれの特徴とその間の遷移が良く説明できることがわかった。多結晶におけるバウシinger効果はそのような粒間の拘束力からの寄与と、より微視的な転位機構からの寄与の両者によりひきおこされているが、いずれの機構についてもバウシinger効果の粒径依存性は加工硬化の粒径依存性を通じて間接的に生じていると思われる。

以上のようなバウシinger効果の解析は $\epsilon_B(1)$ についてのみ行われたが、バウシinger効果を表わす他のパラメーターは、本研究で荷重方向反転中の応力-ひずみ曲線の形状を解析することによって見出した現象論的な関係式からその挙動が類推できる。

以上述べてきたように、本研究によって多結晶体の変形において粒間の拘束力の果たす役割がかなり明確にされ、従ってより微視的な転位機構によって説明されるべき諸性質が明らかにされたように思う。そのような転位機構についての理解は今後の研究に待つところが大きい。

審 査 結 果 の 要 旨

金属材料は通常多結晶のかたちで使用されていて、その機械的性質については多くの研究が行われている。しかし加工硬化挙動やバウシinger効果などを微小ひずみ、巨視的変形両域にわたって、結晶粒径依存性と関連づけて研究した例はほとんどない。本論文はそれらを結晶粒間の拘束という観点から統一的に理解しようとして行った研究結果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論で、本研究の背景と目的が述べられている。

第2章では巨視的変形域での多結晶粒間の拘束力に関するパラメーターとして用いられている、活動すべり面の種類の数と方位因子との関係をKröner - Bundikuski - Wuのモデル(KBWモデル)による計算に基づいて検討した結果を述べている。結晶粒間の拘束力がある程度発達した段階では、従来指摘されてきたこれら2つのパラメーター間の矛盾は見かけ上のものにすぎないことが示されている。

第3章では結晶粒径の異なる試料の応力-ひずみ曲線が巨視的変形域で交差する現象の原因を明らかにするため、銅を用いて行った実験の結果が述べられている。そのような交差は結晶粒径方位分布のかたよりによる方位因子の変化から説明され、結晶粒径依存性の本質ではないことが明らかにされている。

第4章では加工硬化挙動の結晶粒径依存性を明らかにするため、銅とCu-0.5 wt. % Sn合金を用いて行った実験の結果を述べている。加工硬化の結晶粒径依存性の大部分は結晶粒間拘束力の大きい微小ひずみ域で生じていて、試料全体がほぼ均一に変形する巨視的変形域ではほとんど結晶粒径依存性を示さないことを明らかにしている。

第5章は前章の実験と対応して行ったバウシinger効果に関する結果を述べたものである。予ひずみ依存性、結晶粒径依存性とも加工硬化と同様巨視的降伏を境にその挙動を異にすることを見出している。またKBWモデルを拡張することによって、一方向変形とバウシinger効果との実験結果が統一的に理解できることが示されている。

第6章は総括である。

以上要するに、本論文は多結晶の変形における結晶粒間の拘束力に関して新しい知見を加えると共に、微小ひずみ、巨視的変形両域にわたる加工硬化挙動やバウシinger効果などの結晶粒径依存性を明らかにして、多結晶金属の強度に関する理解を深めたもので、金属工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。